



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia de Produção

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DE CAMINHÕES

Luiz Felipe Sousa Melo Vieira

Orientador

Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia

Brasília
2018.



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DE CAMINHÕES

Luiz Felipe Sousa Melo Vieira

Relatório submetido como requisito parcial
para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Prof. Ph.D Reinaldo Crispiniano Garcia
Departamento de Engenharia de Produção

Prof. Ph.D João Mello da Silva
Departamento de Engenharia de Produção

Brasília, 06 de dezembro de 2018.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e aos meus professores.

Agradecimentos

Este trabalho, materializa o encerramento de uma grande jornada, na qual tive o prazer de encontrar pessoas incríveis. Professores, colegas e funcionários da Universidade de Brasília. Meu agradecimento à eles, que de alguma forma ou de outra, contribuíram para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Resumo

A presente pesquisa trata da aplicação de conceitos de otimização pertencentes à área de Pesquisa Operacional, na busca pelas melhores rotas de caminhões-pipa que fazem o transporte emergencial de água para diversos pontos na Região Nordeste do Brasil. A distribuição realizada pela Operação Carro-Pipa é uma das medidas tomadas pelos entes públicos para mitigação dos efeitos da escassez de água na região do semiárido. A programação mensal da distribuição de água entre múltiplas origens e destinos é um dos desafios, os custos com a operação são crescentes e significativos. Este trabalho desenvolveu um modelo matemático, aplicado a um programa desenvolvido na linguagem Python, capaz de fornecer rotas otimizadas para a situação apresentada.

Palavras-chave: Otimização, Pesquisa Operacional, Operação Carro-Pipa, Engenharia de Produção.

Abstract

The present research deals with the application of optimization concepts belonging to the area of Operational Research, in the search for the best routes for trucks that make the emergency transportation of water to several points in the Northeast Region of Brazil. The distribution is carried out by Operação Carro-Pipa, one of the measures that public entities of Brasil perform to mitigate the effects of water scarcity in the semi-arid region. Monthly scheduling of water distribution between multiple sources and destinations is one of the challenges, operating costs are increasing and significant. This work developed a mathematical model and applied it to a program, developed in the Python language, capable of providing optimized routes for the presented situation.

Keywords: Optimization, Operational Research, Operação Carro-Pipa, Industrial Engineering.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.1.3	Justificativa	3
2	Referencial Teórico	6
2.1	Histórico das Secas na Região Nordeste	6
2.2	Quantidade e Qualidade da Água	9
2.3	Os Impactos da Seca	14
2.4	A Operação Carro Pipa – OCP	17
2.5	Pesquisa Operacional	22
2.5.1	A Administração Científica e a Pesquisa Operacional	22
2.5.2	Pesquisa Operacional	25
2.6	Python e PuLP	28
3	Metodologia	30
3.1	Classificação da Pesquisa	30
3.1.1	Natureza da Pesquisa	30
3.2	Procedimentos Técnicos	31
3.2.1	Definição do Problema	31
3.3	Modelo de Otimização das Rotas	32
3.3.1	Modelo Matemático	32
3.3.2	Programação Computacional do Modelo	35
3.3.3	Otimização dos Dados Cedidos	35
3.3.4	Refinamento do Código	36
3.3.5	Limitações do Modelo	37
4	Resultados	38
4.1	Análise da Metodologia	38

4.2 Resultados do Modelo	38
4.2.1 Otimização das Rotas	38
4.2.2 Priorização dos Mananciais com Melhor Qualidade de Água	40
5 Considerações Finais	43
5.1 Conclusão	43
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	43
Referências	45
Anexo	46
I Programa 1	47
II Programa 2	51

Lista de Figuras

2.1 Sistema de Aquífero (ANA, 2017)	10
2.2 Açude entre Campo Sales e Antonina do Norte (CE) - Fonte: Banco de Imagens da Agência Nacional de Águas	12
2.3 Barragem do Açude Orós (CE) - Fonte: Banco de Imagens da Agência Nacional de Águas	12
2.4 Mapa interativo com dados históricos do IQA - Fonte: http://portal1.snirh.gov.br . 14	
2.5 Incidência de Secas [Agência Nacional de Águas, 2017]	15
2.6 Organograma - Órgãos participantes da OCP Adaptado da Portaria Inter- ministerial de 2012	19
2.7 Caminhão Pipa com identificação da Operação Carro-Pipa - Fonte:Portal Governo do Brasil - www.brasil.gov.br	21
2.8 Representação gráfica das variáveis do Problema do Transporte. Fonte: Ela- borado pelo Autor.	28
4.1 Volume de água fornecido por cada reservatórios - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor	40
4.2 Volume de água fornecido - Reservatórios Tipo A - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor	40
4.3 Volume de água fornecido - Reservatórios Tipo B e C - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor	41
4.4 Percentual de utilização dos reservatórios - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor	41

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros de Qualidade da Água - Fonte: [PNQA, 1975]	13
2.2	Classificação IQA - Fonte:[PNQA, 1975]	13
2.3	Índices de Seca Regional - Fonte: [ANA, 2012]	16
2.4	Divisão de Direção e Execução - Fonte: Adaptado da Portaria Interministerial de 2012	18
3.1	Matriz de Distâncias.	32
3.2	Aumento Relativo nas Distâncias - Elaborado pelo Autor	36
4.1	Resultados dos Programas e Testes - Fonte: Elaborado pelo autor.	39

Capítulo 1

Introdução

A problemática da seca na Região Nordeste brasileira é conhecida desde o período imperial. O desafio de desenvolver a região continua sendo uma tarefa árdua. A despeito das naturais intempéries que assolam o semiárido, o desenvolvimento acontece com a força da população local. Na tentativa de amenizar os efeitos das intensas estiagens, os entes públicos das três esferas de Governo, promovem a Operação Carro-Pipa, uma cooperação interministerial que visa a distribuição emergencial de água potável para quem não tem o recurso.

Com a ajuda da estrutura do Exército Brasileiro e por meio da contratação de motoristas de caminhões-pipa, milhares de pessoas recebem água potável para consumo. A operação que nasceu com intuito de atender emergências, hoje acontece quase que de forma permanente. O número expressivo de recursos gastos evidencia o apelo e a necessidade da operação que, infelizmente não tem perspectivas de finalização no médio e longo prazo.

O presente trabalho, tem como propósito, abordar a otimização das rotas de distribuição de água, considerando distintas prioridades entre reservatórios. São inúmeros pontos para captação de água múltiplos e pontos de entrega. Além disso, o programa é dinâmico, com atualização mensal o volume de água e nos pontos de captação e entrega. A designação dos pares de origem e destino da água é realizada pela Administração Pública,

que paga a terceirizados pelo transporte da água. A priorização entre os reservatórios é motivada pelas diferentes qualidades de água. Assim sendo, a busca pelas melhores rotas é um dos pontos que, se bem aplicado, pode reduzir custos e aumentar a eficiência da operação. A priorização da qualidade de água tem impacto direto na saúde da população atendida.

A Engenharia tem meios para abordar o desafio e propor soluções, algoritmos de otimização largamente utilizados para os mais diversos fins podem trazer resposta também para este problema.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho busca desenvolver um modelo matemático capaz de indicar as rotas otimizadas para o sistema de abastecimento de água, realizado por caminhões pipa, com múltiplas origens e destinos, considerando-se diferentes prioridades entre reservatórios.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver modelo matemático genérico de Programação Inteira para o problema das rotas dos carros-pipa;
- Desenvolver o código de computador customizável capaz de solucionar o Modelo de Otimização Proposto;
- Avaliar a variação do impacto da priorização para diferentes cenários com dados do Estado do Ceará;
- Indicação das rotas ótimas e seus possíveis ganhos para um conjunto de dados reais referente ao Estado do Ceará.

1.1.3 Justificativa

A escassez de água é um problema histórico da região nordeste brasileira, os primeiros registros de seca datam dos primeiros séculos do período de colonização. Na época, a iniciante agricultura foi fortemente impactada. Nos versos de Morte e Vida Severina (1955) o poeta João Cabral de Melo Neto relata o drama dos retirantes assolados pelas dificuldades da vida no clima do semiárido. Em registros institucionais ou artísticos, o problema da seca se fez presente na história nacional.

Ao longo dos anos, iniciativas institucionais buscaram enfrentar o problema e proporcionar melhores condições para o desenvolvimento da região. Em 1909 foi criada a Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS) que posteriormente adquiriu o status de departamento nacional, o que hoje é conhecido como Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Esta foi a primeira iniciativa para estudo da problemática do semiárido. O órgão foi responsável por uma série de ações entre elas: obras de infraestrutura, açudes, fornecimento de serviços públicos telegráficos e energia elétrica. O papel realizado pelo DNOCS ao longo do tempo foi dividido com os entes estaduais e outros órgãos especializados [DNOCS, 2013].

No âmbito federal, em julho de 2012, a portaria interministerial dos Ministérios da Defesa e Integração Nacional estabeleceu a relação de cooperação técnica e financeira para realização de ações complementares de apoio às atividades e distribuição emergencial de água potável às populações atingidas por estiagem, abarcando o semiárido nordestino, região norte dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Esta política pública foi denominada de Operação Carro-Pipa (OCP).

A portaria define que a responsabilidade pela direção das ações será compartilhada pelos níveis federais, estaduais e municipais. A portaria descreve ainda as responsabilidades de inclusão e exclusão de municípios, forma da distribuição emergencial, de fiscalização e prestação de contas. Traz ainda a definição de seca como *"estiagem prolongada, caracterizada por provocar redução sustentada das reservas hídricas existentes"*.

O Tribunal de Contas da União (TCU) realizou auditoria operacional tendo como

objeto a Operação Carro-Pipa. O TCU demonstrou que, no ano de 2012 foram executados cerca de 349 milhões de reais para as operações, atendendo 3,8 milhões de pessoas em 780 municípios. No ano de 2016, o TCU aponta que o repasse ao Exército Brasileiro foi superior a 860 milhões de reais para atendimento a 3,7 milhões de pessoas em 827 municípios. Os números dão a dimensão da OCP e do crescimento no período.

A responsabilidade pela indicação do ponto de captação e qual localidade deve atender ficou a cargo do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos (Cenad), sendo este um enorme desafio dado o dinamismo do cenário. Conforme consta no relatório do TCU há variação tanto nos pontos de captação de água quanto nos pontos de entrega, o que exige constante reavaliação das indicações das localidades de distribuição de água. Dado que os recursos dos pontos de captação são finitos observa-se que as indicações das origens e destinos têm influência direta na distância percorrida pelos carros-pipa e consequentemente no frete, custo significativo da operação[Tribunal de Contas da União, 2013].

Os dados entre os anos de 2012 e 2017, anos de seca foram expressivos para o programa. O investimento realizado em 2017 foi cerca de 1 bilhão de reais [Ministério da Integração, 2018].

Os normativos constitucionais e infraconstitucionais preceituam os princípios da economicidade e do uso eficiente dos recursos públicos, para administração direta e indireta. Estando a OCP dentro do contexto da administração pública, sujeita-se aos princípios mencionados.

O problema do apontamento dos pares origem-destino no transporte de recursos é objeto de estudo da Pesquisa Operacional. Segundo a ABEPRO, está entre competências de um engenheiro de produção “projetar, implementar e aperfeiçoar sistemas, produtos e processos” e, ainda, “utilizar ferramental matemático e estatístico para modelar sistemas de produção e auxiliar na tomada de decisões” [ABREPO, 2009].

Considerando os dados históricos percebe-se que os problemas enfrentados na região Nordeste, na questão de abastecimento de água potável, não serão solucionados no médio e no longo prazo. Os custos e o apelo social da OCP são significativos. Os entes públicos envolvidos têm interesse no aprimoramento de seus processos e o autor deste trabalho tem

o desejo e a oportunidade de contribuir dentro da sua área de conhecimento.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Histórico das Secas na Região Nordeste

O início da ocupação da região nordeste ocorreu pelo litoral de Pernambuco à Bahia, locais onde o solo argiloso constitui-se de massapé e clima que alterna entre estações secas e chuvosas. Tal situação favoreceu o plantio de cana de açúcar. Em outros locais, como ao norte de Olinda, foi desenvolvida a pecuária com intuito de atender as demandas da mão de obra empregada nos engenhos. Os primeiros períodos de secas registrados ocorreram entre os séculos XVI e XVII, impactando as culturas de milho, mandioca e cana de açúcar e por consequência a pecuária [Campos, 2014].

As diferenças climáticas entre o litoral e o sertão explicam a gradativa ocupação do território. No sertão, a frequência e intensidade das secas é maior que na região litorânea, sendo a segunda afetada somente em períodos de maior severidade. Porém, o que explica a ocupação da região são os períodos de clima favorável. Após a seca do ano de 1845, passaram-se 32 anos sem um novo registro de seca severa na região. Por causa da falta de conhecimento a respeito dos riscos climáticos regionais, a população se assentou, sem infraestrutura adequada para momentos de falta de água. Entre 1877 e 1878, ocorreu uma desastrosa seca; a estimativa de mortalidade no Ceará foi de aproximadamente 500 mil pessoas, mais da metade da população na época.

Após o incidente, ocorreu intenso debate a respeito do tema, em que se destacaram quatro intelectuais. Raja Gabaglia acreditava que o problema estava centrado na ação antrópica na região que não conservou as matas. Capanema acreditava que não seria possível evitar a ocorrência das secas e que medidas como a construção de reservatórios de água e alimento para animais poderiam mitigar os problemas. Viriato, assim como Capanema, não acreditava na possibilidade de evitar o problema, porém considerava viável a prevenção das secas com três a quatro meses de antecedência para a partir disto, fazer o remanejamento de pessoas e criações para locais onde a seca não chegava. A solução proposta por Capanema foi executada durante décadas. Por fim o matemático e militar Henrique Beaurepaire Rohan concordava com as duas visões anteriores a respeito da impossibilidade de evitar a ocorrência das secas, mas criticava o modelo de manejo de rebanhos e acreditava que o Estado deveria intervir promovendo infraestrutura na região.

Em outubro de 1877 o governo imperial criou uma Comissão no intuito de realizar estudos de viabilidade de sistemas de irrigação na região e assim mitigar os efeitos dos períodos de estiagem. Fez parte desta Comissão Henrique Rohan, que defendia a construção de açudes. Como resultado a Comissão apresentou relatório com indicações de obras de infraestrutura, construção de açudes e um canal entre os rios São Francisco e Jaguaribe.

Pouco mais de uma década depois ocorreu a Proclamação da República Brasileira (1889). O novo governo realizou parte das obras propostas pela Comissão Eleitoral e criou a Inspetoria de Obras Contra as Secas em 1909, sinalizando a continuidade de ações do Estado frente ao problema através de políticas públicas. Porém as soluções não eram triviais: boa parte dos rios poderia ficar longos períodos secos e as águas subterrâneas não eram suficientes para o abastecimento da população. As duas principais opções eram a criação de açudes e a transposição do rio São Francisco. A segunda opção era inviável para os recursos da época, tanto pela falta de tecnologia quanto pela parte financeira. A açudagem foi então a principal política para a região, ainda que já estivesse claro na época, que essa medida seria paliativa. Uma outra corrente, minoritária, defendia a construção de barragens para somar aos açudes.

Em 1915 e, entre os anos de 1929 e 1933 ocorreriam novas secas, provocando a migração em massa de retirantes para os Estados do Sudeste. Nestes períodos ocorreram tentativas de impedimento dos fluxos migratórios, essas tentativas se repetiram outras vezes, porém sem muito sucesso.

Na década de 1950 já haviam sido construídos uma série de açudes e suprimento elétrico razoável. O poder público já contava com o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), Banco do Nordeste do Brasil e Companhia Hidrelétrica do Rio São Francisco (CHESF). O DNOCS, órgão cujo o nome originário era Inspetoria de Obras Contra as Secas (criado ainda no período imperial), teve diversos nomes e em 1945 foi denominado pelo nome que mantém até o presente momento. Em 1959, foi criada a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) com o objetivo de encontrar soluções para a região como o investimento industrial, a colonização do Maranhão e outras medidas.

Durante o governo militar, a abordagem em relação aos problemas da região foi conservadora, as obras de infraestrutura e açudes na região continuaram. Durante o período não foram registrados períodos de secas intensos. Entre os anos de 1972 e 1976 ocorreu o inverso, período com chuvas acima da média.

Com a Constituição de 1988, os estados passaram a ter maior responsabilidade na elaboração de políticas públicas e soluções para a problemática da seca. Todavia existem fatores limitantes nesta atuação: a fragilidade institucional, a dependência de recursos federais e a falta de coordenação entre as diferentes esferas de gestão de secas dificultam o progresso das iniciativas locais.

A breve síntese do período imperial até a Constituição de 1988 foi elaborada com base no trabalho de Campos (2014).

Entre os anos de 2012 e 2017 foi o período de seca mais recente de registrado na região Nordeste. O número de municípios que decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) aumentou vertiginosamente. Entre 2003 e 2011, os números de SE ou ECP foram da ordem de 370 casos em média. No ano de 2012, o

número passou para 1.217 ocorrências, e no e em 2013 foram 1.343 casos. Os números de ocorrências foram se reduzindo gradativamente ao longo dos anos, porém em 2016 o número estava em 937, ainda muito acima da média. Dados do relatório do TCU de 2013[Agência Nacional de Águas, 2017].

2.2 Quantidade e Qualidade da Água

A atenção à qualidade da água distribuída pela OCP é um ponto crucial para o sucesso da operação. As populações atendidas utilizam o recurso distribuído para suas necessidades mais básicas.

A qualidade das águas é influenciada por fatores naturais do ciclo hidrológico e pelas ações antrópicas. O ciclo hidrológico é definido como o conjunto das variações do estado e das características das massas de água que se repetem no tempo e no espaço. A massa de água pode pertencer a rios, a lagos, barragens e açudes no caso das águas superficiais e lençóis freáticos e a aquíferos nos casos de massas de águas subterrâneas.

A água proveniente das chuvas tem basicamente duas destinações. Na primeira, a água passa pelo processo de infiltração em solo poroso e é armazenada como água subterrânea. A outra destinação é o escoamento até córregos, lagos e rios. No processo de infiltração, ao passar pelos sedimentos, a água acaba por levar partículas do solo. O tipo de partícula varia conforme a ocupação do solo, seja para agricultura ou área urbana. A água que escoar, em seu percurso pode receber também efluentes de múltiplas origens como: esgoto de indústrias, drenagem agrícola, esgoto doméstico e etc [Agência Nacional de Águas, 2017].

Em relação a geologia da região, basicamente são encontrados dois tipos estruturais: embasamento cristalino e bacias sedimentares. O embasamento cristalino é encontrado nas zonas de maior aridez, onde os solos são rasos; tem baixa capacidade de infiltração e alta taxa de evaporação. Essa formação ajuda a explicar o caráter intermitente da maior parte dos rios da região. Por exemplo, nas bacias sedimentares que abrangem todo o estado do

Maranhão, os solos em geral são profundos, entre 2 a 6 metros, com alta capacidade de infiltração e baixo escoamento superficial [Agência Nacional de Águas, 2017].

Esses ambientes com maior facilidade de infiltração de água e menor taxa de evaporação atuam como reservatórios naturais para os rios. Os rios, nos quais a margem armazena água, têm menores probabilidades de secar durante as estiagens. A situação é ilustrada pela Figura 2.1.

Durante o ciclo hidrológico, existe variação da qualidade da água em especial nos rios intermitentes que, por sua vez, abastecem açudes. Iniciando pelo período seco, a tendência é de deterioração da qualidade de água. Nas primeiras chuvas, a água que escoar não é de boa qualidade, pois ocorre a “lavagem” do acúmulo de sujeira do período seco. Com a continuidade das chuvas, a tendência é de melhora na qualidade da água, pelo processo de diluição dos resíduos. Ao fim do período de chuvas e vertimento das águas, começa o período de renovação da água com uma considerável melhora.

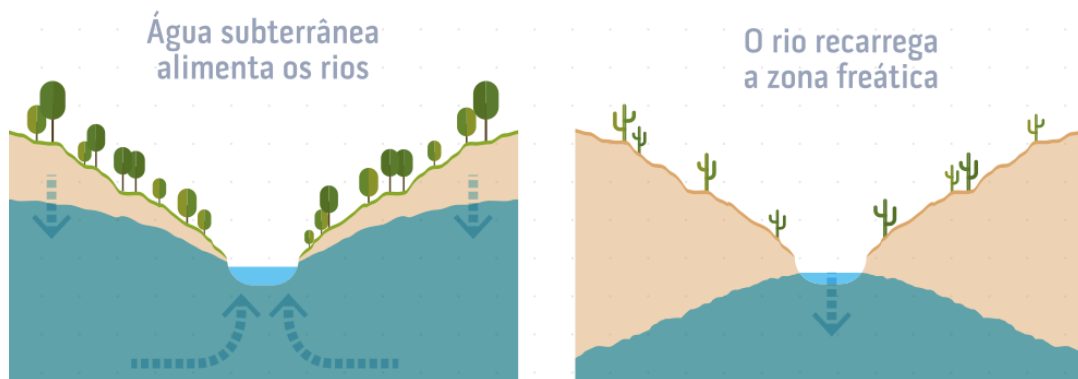


Figura 2.1: Sistema de Aquífero (ANA, 2017)

A intensidade da chuva também pode exercer influência. Chuvas mais intensas e de curta duração tendem de aumentar a turbidez da água pela movimentação mecânica das partículas.

Em relação as normas legais a respeito do consumo e distribuição da água houve notória mudança. Isso aconteceu devido ao fato que houve crescimento do uso da água ao longo dos anos e agravamento das ocorrências de episódios de secas nas mais diversas áreas do país. A visão antiga, de abundância do recurso, foi perdendo espaço aos poucos

para o entendimento de que é necessária uma gestão responsável, que considerando os preceitos de sustentabilidade.

A primeira legislação a tratar do tema do uso e da apropriação da água foi o Decreto Federal nº 24.643 de 1934, denominado Código das Águas. No contexto da época, o país passava por um processo de modernização e desenvolvimento econômico e o recurso era visto como abundante.

Em 1997 a lei nº 9.433 criou a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), um instrumento que orienta a gestão das águas. Em seu texto, a lei apresenta os fundamentos sobre o direito do uso da água, a limitação e gestão do recurso e as prioridades em caso de escassez. Entre os objetivos da PNRH estão o de assegurar a atual e às futuras gerações água em padrões de qualidade adequados, uso racional e preservação deste recurso[Agência Nacional de Águas, 2017].

A lei também institui o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH) o qual é formado por representantes dos poderes públicos federais, estaduais e municipais. No âmbito federal estão o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e a Agência Nacional de Águas. No nível estadual estão os respectivos Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal e, no nível municipal os respectivos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

A maior parte do monitoramento hidrológico no Brasil é feito pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH). Esse acompanhamento tem o intuito de quantificar a qualidade e quantidade de água disponível no território nacional. No ano de 2016, a RNH contava com mais de 20 mil estações espalhadas pelo território nacional, sob responsabilidade de diversas entidades. No mesmo ano foram mapeados mais de 19 mil reservatórios artificiais. A maior parte do volume dos reservatórios é de responsabilidade do setor elétrico.

Especificamente na Região Nordeste, há 133 reservatórios estratégicos, com capacidade igual ou superior a 10 milhões de metros cúbicos, açudes de capacidade interanual. Outros 265 reservatórios de menor porte, acumulam águas das chuvas para a utilização no período não chuvoso do mesmo ano. Cerca de 67% do abastecimento público urbano da região

é dependente do sistema de açudes. As Figuras 2.2 e 2.3 são dois exemplos dos açudes citados.



Figura 2.2: Açude entre Campo Sales e Antonina do Norte (CE) - Fonte: Banco de Imagens da Agência Nacional de Águas



Figura 2.3: Barragem do Açude Orós (CE) - Fonte: Banco de Imagens da Agência Nacional de Águas

No Brasil, a principal referência de qualidade de água é o Índice de Qualidade das Águas, criado nos Estados Unidos pela National Sanitation Foundation em 1970, que a partir de 1975 passou a ser utilizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) [PNQA, 1975].

De maneira geral, este índice expressa a qualidade da água no rio comparada com a qualidade requerida para abastecimento público após tratamento convencional. Apresenta limitações, sendo que não considera todos os aspectos, como por exemplo, a presença de

metais pesados, porém é uma medida de bom entendimento geral. As águas superficiais podem ter o uso mais diversificado do que as águas subterrâneas, como o industrial, recreativo, produção de alimentos e abastecimento humano. Cada uso tem sua respectiva classificação limitante.

Parâmetros de Qualidade da Água do IQA e respectivo peso	
PARÂMETRO DE QUALIDADE DA ÁGUA	Peso (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico - pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO _{5,20}	0,1
Temperatura da água	0,1
Nitrogênio total	0,1
Fósforo total	0,1
Turbidez	0,08
Resíduo total	0,08

Tabela 2.1: Parâmetros de Qualidade da Água - Fonte: [PNQA, 1975]

A classificação da qualidade da água varia de acordo com o Estado analisado conforme a Tabela 2.2 :

Classificação do IQA conforme o Estado		
Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: AL, MG, MT, PR, RJ, RN, RS	Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: BA, CE, ES, GO, MS, PB, PE, SP	Avaliação da Qualidade da Água
91-100	80-100	Ótima
71-90	52-79	Boa
51-70	37-51	Razoável
26-50	20-36	Ruim
0-25	0-19	Péssima

Tabela 2.2: Classificação IQA - Fonte:[PNQA, 1975]

Os parâmetros mais importantes do índice de qualidade são alterados principalmente pelas seguintes causas:

Demanda Bioquímica por Oxigênio (DBO) – indica a quantidade de oxigênio consumido na degradação de matéria orgânica: bom indicador de poluição de esgotos domésticos e industriais;

Oxigênio Dissolvido (OD) – indicador relacionado a saúde dos ecossistemas ao redor da massa de água. O déficit indica contaminação por cargas orgânicas;

Fósforo – em áreas urbanas indica a poluição por efluentes domésticos. No campo pode indicar processos de erosão no solo, e é um dos principais nutrientes responsáveis pela eutrofização de lagos e reservatórios;

Turbidez – mede a quantidade de material em suspensão na água.

Fonte: [Agência Nacional de Águas, 2017].

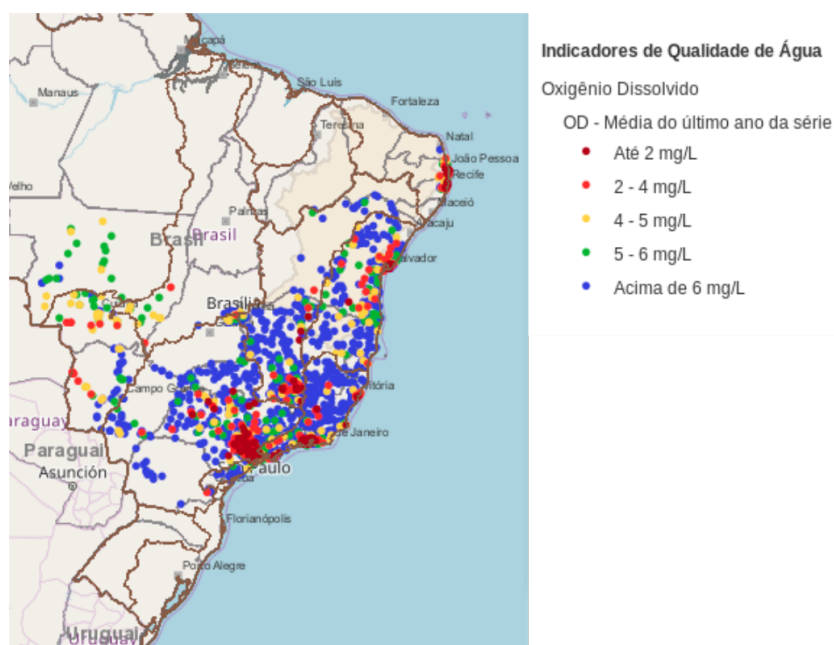


Figura 2.4: Mapa interativo com dados históricos do IQA - Fonte: <http://portal1.snirh.gov.br>.

2.3 Os Impactos da Seca

Quem mais sofre os efeitos das secas são os assalariados que não possuem terra e os pequenos proprietários cuja atividade é para subsistência. Em geral essas pessoas não acumulam recursos para os períodos de estiagem. Dado que podem ocorrer longos períodos entre secas mais intensas, não se cria o hábito de tomar medidas capazes de

mitigar os efeitos destes períodos. No entanto, os impactos são vividos por todos na região: o fenômeno afeta os médios e grandes produtores, o setor de serviços que depende do restante da economia e a própria arrecadação pública.

Para melhor entendimento da problemática na região é necessário diferenciar entre aridez e seca. Enquanto a primeira está relacionada com as características climáticas da região, a seca é um fenômeno extremo que ocorre em determinado lugar em um determinado espaço de tempo. A Região Nordeste apresenta variações tanto em aridez quanto em incidência de secas. A Figura 2.5 apresenta o mapa com incidência de secas na região.

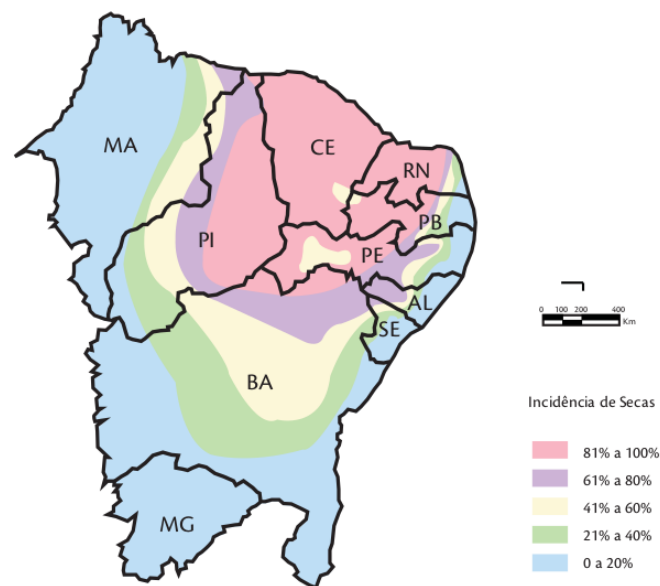


Figura 2.5: Incidência de Secas [Agência Nacional de Águas, 2017]

A Portaria Interministerial 1/MI/MD, de 25 de julho de 2012 [Ministério da Integração, 2012] traz a sua definição de seca como sendo *"estiagem prolongada, caracterizada por provocar redução sustentada das reservas hídricas existentes"*

Na literatura, o conceito de seca pode ser estudado por tipos sendo, eles:

- Seca Meteorológica;
- Seca Agrícola;
- Seca Hidrológica;

- Seca Regional.

Cada tipo pode ter múltiplos índices para fins distintos. Destaque para a Seca Regional que tem dois índices, conforme Tabela 2.3.

Comparativo de Índices de Seca Regional					
Tipo	Denominação do Índice	Descrição do Índice	Classificação das Secas	Qualidades do Índice	Limitações do Índice
Seca Regional	Índice de Área de Seca (IAS)	Porcentagem de uma dada região sob condição de seca baseada no índice de intensidade de seca	A seca é definida com base em um índice específico	Quantifica a extensão da área de seca	Não fornece a intensidade média da seca para a região
	Índice de Gravidade da Seca (IGS)	Peso da área com índice médio de intensidade de seca sobre a área total de seca em dada região	A seca é definida com base em um índice específico	Quantifica a intensidade da seca para uma região	Não fornece a extensão da área de seca.

Tabela 2.3: Índices de Seca Regional - Fonte: [ANA, 2012]

Na saúde, a escassez de água tem impacto direto. A falta de água e sobretudo a falta de água de boa qualidade, força a população a consumir e utilizar nas atividades diárias a água disponível, que por vezes não é de boa qualidade. A demanda por atendimento hospitalar aumenta nos períodos de seca para os casos de doenças mais evidentes, porém outros problemas somente são percebidos ao longo dos anos. A desnutrição é um dos principais fatores de defasagem do Nordeste em relação às regiões mais desenvolvidas do país.

A economia ainda é facilmente afetada pelos períodos de estiagem. Com a baixa na produção da agricultura pecuária e turismo, diminui a procura de serviços e por fim os municípios arrecadam menos impostos.

O desenvolvimento da região esbarra na falta de infraestrutura capaz de atender empresas que possam vir a se instalar na região. E as medidas, que poderiam minimizar a fragilidade hídrica da região, não são viáveis do ponto de vista econômico atual, percebendo-se um problema de causalidade circular. Apesar das dificuldades nos últimos anos, instalou-se o Porto do Açu, um dos grandes empreendimentos da região.

2.4 A Operação Carro Pipa – OCP

A Operação Carro-Pipa (OCP) foi instituída pela Portaria Interministerial N° 7 de 10 de agosto de 2005 [Ministério da Integração, 2005], na qual foi firmada a mútua cooperação técnica e financeira entre o Ministério da Integração Nacional (MI) e Ministério da Defesa (MD). Após sete anos de vigência uma nova portaria renovou o acordo firmado entre os mesmos Ministérios, a Portaria Interministerial MI/MD N° 1, de 25 de julho de 2012 [Ministério da Integração, 2012] e três anos depois a Portaria Interministerial N° 2, de 27 de março de 2015 [Ministério da Integração, 2015], modificou a redação de seis artigos sem sobretudo alterar os princípios do texto de 2012.

Dispõe sobre a mútua cooperação técnica e financeira entre os Ministérios da Integração Nacional e da Defesa para a realização de ações complementares de apoio às atividades

de distribuição de água potável às populações atingidas por estiagem e seca na região do semiárido nordestino e região norte dos Estados de Minas Gerais e do Espírito Santo, denominada Operação Carro-Pipa.

Ementa da Portaria Interministerial Nº 1, de 25 de julho de 2012 [Ministério da Integração, 2012].

A portaria traz em seu texto as etapas para funcionamento da operação, os órgãos envolvidos nos três níveis de governo e suas respectivas responsabilidades e explica a dinâmica da operação e as formas de fiscalização e de prestação de contas.

A atuação do Ministério da Integração Nacional é realizada por meio da Secretaria Nacional de Defesa Civil (Sedec), órgão central do Sistema Nacional de Proteção Civil (Sinpdec). Em relação ao Ministério da Defesa, o órgão interno responsável pela execução é o Comando do Exército.

A coordenação da OCP ficou sob a responsabilidade do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos (Cenad), subordinado a Sedec. O Cenad tem como objetivos “Reduzir a vulnerabilidade a desastres por meio de políticas de prevenção” e “Ampliar e qualificar a capacidade de resposta a desastres” [Ministério da Integração, 2011].

A execução da OCP ficou a cargo do Exército Brasileiro, instituição pertencente ao Ministério da Defesa. A instituição tem a competência e estrutura para atuação em situações de adversidade como as encontradas na OCP. A Figura 2.6 representa o organograma dos órgãos envolvidos, com a ressalva que os "pipeiros" são contratados.

Além dos órgãos já citados, vinculados a esfera federal, órgãos dos Governos Federais e Prefeituras Municipais também atuam na OCP. A Figura 2.4 mostra a divisão das competências de direção e execução de cada nível de governo.

	Direção	Execução
Federal	Ministério da Integração Nacional	Secretaria Nacional de Defesa Civil
	Ministério da Defesa	Comando do Exército
Estatual	Governos Estaduais	Órgãos Estaduais de Defesa Civil
Municipal	Prefeituras Municipais	Órgãos Municipais de Defesa Civil

Tabela 2.4: Divisão de Direção e Execução - Fonte: Adaptado da Portaria Interministerial de 2012

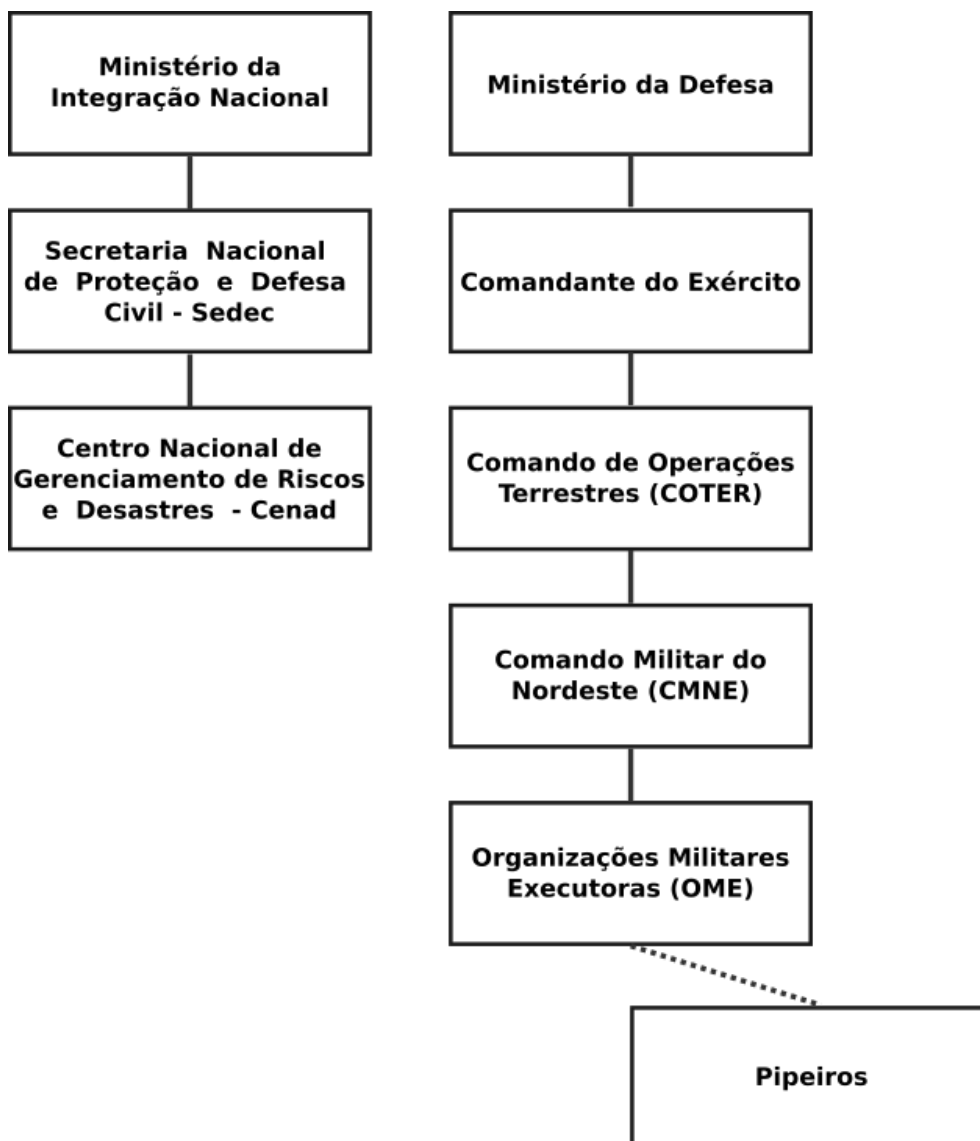


Figura 2.6: Organograma - Órgãos participantes da OCP Adaptado da Portaria Interministerial de 2012

No nível federal, o Ministério da Integração Nacional, através da Sedec, ficou responsável, entre outros, por estabelecer diretrizes, supervisão das ações e a prestação de contas. O Ministério da Defesa, por intermédio do Comando do Exército, tem entre suas responsabilidades o planejamento da distribuição, a contratação de serviços de "pipeiros", a vistoria de caminhões e a aquisição equipamentos e softwares para a realização da operação.

Os municípios atendidos pela operação variam de acordo com a necessidade. Para receber atendimento, o município deve por meio da defesa civil local ou Prefeitura, se não

houver defesa civil, realizar a solicitação diretamente à Sedec, via ofício. Essa solicitação é cabível no caso de decretação de Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP). Ainda é necessário relatório técnico com informações a respeito da estiagem e do número de pessoas que necessitam de assistência. A portaria descreve também as situações de exclusão de municípios, fiscalização e prestação de contas.

No seu relatório o TCU, faz a observação que a distribuição emergencial pode continuar em municípios que estejam sofrendo estiagem, mas não tenham decretado SE ou ECP. Essa inclusão fica a critério da Sedec, que autoriza ou não após análise [Tribunal de Contas da União, 2013].

O planejamento da distribuição é realizado primeiro com a localização dos mananciais ou pontos de captação de água e dos pontos para abastecimento. Também são coletado as distâncias entre os respectivos pontos de captação e abastecimento. É definido um responsável pelo recebimento dos carros-pipa (apontador ou controlador) e, finalmente, o número de pessoas atendidas. O cálculo do volume de água para cada localidade é feito considerando 20 litros por pessoa por dia. O plano de distribuição do Exército Brasileiro (EB) é elaborado para um período de 30 dias, com base nas informações mais recentes.

A distribuição da água potável é realizada por motoristas de carros-pipa, popularmente conhecidos como pipeiros, que por meio de contratação realizam o serviço utilizando veículos particulares. Cada Organização Militar Executora (OME) mantém um cadastro de motoristas e a contratação é realizada via Contrato Individual de Prestação de Serviço. As variáveis principais de custo para fins de pagamento são a distância entre os pontos de captação e entrega e o tipo de estrada. Após contratação, cada OME elabora uma planilha com as indicações dos pontos de captação, entrega, quantidade e dia para cada pipeiro. A Figura 2.7, exemplifica um dos caminhões da OCP com a devida identificação.



Figura 2.7: Caminhão Pipa com identificação da Operação Carro-Pipa - Fonte:Portal Governo do Brasil - www.brasil.gov.br

A contratação é realizada por contrato individual, com cada motorista de caminhão, previamente cadastrado. A designação de volume e da rota individual é definida pelo Exército, tendo como limitante apenas um teto de pagamento para cada motorista.

O cálculo para pagamento dos pipeiros foi definido pelo Ministério da Defesa. A conta considera as seguintes variáveis:

- Volume (V) de água transportado;
- Distância (D) do Manancial até o Ponto de Distribuição;
- Quantidade (Q) de viagens realizadas;
- Índice Multiplicador (I) que varia conforme o tipo de rodovia, com ou sem asfalto.

A multiplicação dessas variáveis expressa o Momento de Transporte, valor utilizado para pagamento dos pipeiros.

$$\text{Momento de Transporte} = V * D * Q * I$$

Fonte: Cartilha Operação Carro-Pipa [Ministério da Defesa, 2009].

No que tange à qualidade da água, as prefeituras têm a incumbência de atestar mensalmente a qualidade das águas dos mananciais através de laudos. Outra medida adotada é

a distribuição pela OME de pastilhas de cloro aos pipeiros para que coloquem nos tanques de água.

O relatório do TCU descreve ainda outras atribuições do EB na OCP, como por exemplo, toda a dinâmica de fiscalização dos caminhões, das viagens, contratação de programas para rastreamento de veículos. O TCU aponta também deficiências ou inconsistências observadas e elenca diversas recomendações para melhoria da OCP. Vale destacar que uma das observações trata da perenidade da OCP, que foi idealizada como medida emergencial, contudo até a data do relatório tinha execução sem interrupções [Tribunal de Contas da União, 2013].

2.5 Pesquisa Operacional

2.5.1 A Administração Científica e a Pesquisa Operacional

A organização do trabalho se transformou ao longo da história. Antes do séc. XVIII, predominava ainda o modelo artesanal de produção onde um único indivíduo dominava todas as etapas produtivas. Ao passar dos anos, ocorreu a especialização do trabalho, onde o indivíduo se especializava em realizar uma etapa do processo produtivo. A 1ª Revolução Industrial, ocorrida entre os anos de 1780 e 1860, trouxe resultados produtivos espetaculares e novos problemas surgiram. A complexidade de gestão das empresas cresceu drasticamente, agora fabricando diversos produtos [CHIAVENATO, 2003]. Alocar recursos de maneira eficiente neste novo cenário não é uma resposta trivial. A necessidade de encontrar métodos para a solução destes problemas proporcionou as condições necessárias para o surgimento e o desenvolvimento do ramo de conhecimento conhecido atualmente como Pesquisa Operacional (PO) [Hillier, 2012].

As origens dos estudos são entendidas como as primeiras tentativas de adoção de abordagens científicas na gestão das organizações. Contudo o nome Pesquisa Operacional veio anos mais tarde.

Durante a Segunda Guerra Mundial, a coalizão formada pelos EUA e pelo Reino Unido para alocar de forma eficiente os recursos, empregou diversos cientistas para diversos fins, entre eles os que tinham o objetivo específico de alocar da melhor forma possível os recursos de guerra. A estes era solicitado a realização de pesquisas sobre *operações militares*.

Ao final da guerra, ocorreu a disseminação dos resultados obtidos com as técnicas desenvolvidas, que chegaram às empresas e às universidades. Em 1947, George Dantzig desenvolve o método Simplex. Outras ferramentas dessa área do conhecimento também se desenvolveram nesta época, entre elas programação dinâmica, a teoria das filas e a teoria do inventário [Hillier, 2012].

Ainda que os métodos sejam eficientes, a base geral são operações matriciais com múltiplas iterações. Na década de 1950, a incipiente computação deu grande impulso para os estudos na área da década de 1980, com a popularização dos computadores pessoais, tornou-se viável a um maior número de pessoas tanto a solução de problemas complexos quanto a oportunidade de desenvolvimento de novos métodos. Nesta época surgiram duas novas aplicações computacionais. Os Sistemas Especialistas e Sistemas de Suporte a Decisão (SSD). Os Sistemas Especialistas dão sugestões específicas conforme as variáveis apresentadas enquanto o SSD retorna um conjunto de dados relevantes para o tomador de decisão.

Entre as décadas de 1980 e 2000, um setor da economia chamou atenção por abrir novas frentes de estudos, os supermercados. Os produtos industrializados passaram a utilizar o sistema de código de barras. Os dados gerados nas operações de compra, venda e estoque viraram recursos para tomada de decisão. No período também surgiram os dashboards que se popularizaram por utilizar os Indicadores-Chave de Desempenho (Key Performance Indicators, na sigla em inglês KPIs), desenvolvidos por Kaplan e Nortam, que indicavam aos gestores os dados prioritários para tomada de decisão.

A Pesquisa Operacional continua a desenvolver novos algoritmos e métodos de abordagem e sua aplicação é altamente difundida nos mais diversos setores da economia [MORTENSON, 2015].

Desde o seu nascimento, a Pesquisa Operacional traz soluções para problemas reais, seja de instituições públicas ou privadas. As metodologias propostas pelos autores da área de PO para criação e implementação de modelos levam em consideração que existem variáveis além das numéricas que influenciam a concepção e utilização destes modelos.

Em muitos casos os modelos em grande parte das vezes, são desenvolvidos por uma equipe que realiza o serviço na forma de consultoria para alguma instituição. Isso implica que a equipe não tem familiaridade com a rotina da empresa, seus processos e de seus respectivos gestores. Por outro lado, os contratantes e usuários finais dos modelos não têm, na maior parte dos casos, profundo conhecimento das abordagens utilizadas em PO. Tendo isso em vista, percebe-se que a Modelagem está muito além de encontrar soluções ótimas que muitos algoritmos são capazes de realizar.

A modelagem de problemas em pesquisa operacional segundo Hillier(2012) segue em geral os seguintes passos:

1. Definição do Problema e Coleta de Dados

Identificar o problema correto, os decisores e possíveis conflitos. Idealmente, os objetivos devem considerar o valor para toda a organização e posteriormente a coleta de dados.

2. Formulação de Modelo Matemático

Neste passo ocorre a transformação das variáveis que afetam o problema em parâmetros do modelo e um ou mais objetivos formam a função objetivo do problema. Espera-se que o modelo represente a essência do problema e tenha alta correlação com a realidade.

3. Derivação de Soluções com Base no Modelo

Nesta etapa a equipe de PO analisa apenas soluções matemáticas, mas também faz o comparativo entre soluções de diferentes modelos quando cabível, considerando sua real aplicação no contexto do tomador de decisão.

4. Teste do Modelo

Após a escolha do modelo, é passível que contenha falhas e inconsistências. A equipe deve realizar testes com dados que garantam o máximo de abrangência de falhas possíveis e testes com dados cujos resultados são sabidos ou esperados como por exemplo, dados históricos.

5. Preparação para Aplicar o Modelo

Os modelos de PO em geral utilizam recursos computacionais. A aplicação final dos modelos requer mais recursos para pleno uso dos usuários das soluções. Entre esses recursos estão a interface para entrada ou atualização de dados e a geração de relatório de apoio a decisão.

6. Implementação

No último, passo a equipe de PO deve proporcionar aos usuários do programa e respectivos tomadores de decisão as informações sobre o funcionamento do modelo, desde a entrada de dados até a interpretação dos resultados, e indicar suas limitações.

2.5.2 Pesquisa Operacional

Entre as áreas da Pesquisa Operacional está a Programação Linear, para a solução de uma gama de problemas é criado um modelo matemático com funções lineares. O termo *Programação* do nome é empregado no sentido de planejamento, do planejamento da alocação dos recursos. De forma geral é bastante utilizada na busca da melhor alocação dos recursos em atividades que competem entre si por esses recursos.

Para tal é definido uma função que expressa as variáveis do problema, essa é denominada função objetivo. Conforme o problema a ser resolvido, essa função pode ser do tipo minimizar ou maximizar. No primeiro caso, por exemplo, estão a minimização de custos, falhas ou distância. No caso de maximização pode ser de lucro, vendas ou aproveitamento de material.

Por conseguinte, vêm as funções que dão os limites do problema, chamadas restrições. Dado que os recursos são finitos como, por exemplo, tempo, número de funcionários ou máquinas, é necessário expressar a dinâmica das restrições em forma de expressão e adicionar essa expressão ao modelo. É importante ressaltar que pode haver dependência ou influência entre as restrições o que proporciona um grau a mais de complexidade.

Por fim, existem as equações de natureza também restritiva que expressam outros limites não contemplados nas equações anteriores, como por exemplo não-negatividade, exigência de alguma variável assumir apenas determinada faixa de valor, somente números inteiros ou valores binários.

Um dos métodos mais empregados para solução de problemas de programação linear é o Simplex, procedimento algébrico desenvolvido por George Dantzig em 1947.

O algoritmo funciona através de iterações onde são executadas operações lineares entre as expressões afim de alcançar a melhor ou o melhor conjunto de soluções para o problema. A cada iteração do algoritmo acontece um avanço na direção do objetivo.

O desenvolvimento da computação foi crucial para a amplitude do uso do Simplex e Programação Linear. Apesar de problemas menores serem solucionáveis de forma manual, é com a computação que são encontradas as soluções para problemas de maior relevância. Desde a sua criação até os dias atuais, o método foi refinado. Posteriormente, surgiram outros métodos distintos de soluções para variações de problemas de programação linear. Com a popularização da programação de computadores foram desenvolvidos softwares e bibliotecas com estes métodos, possibilitando a solução de inúmeros problemas. A título de exemplo de softwares podem ser citados LINDO, MATLAB e CPLEX. O Solver, uma extensão para Excel que provê esse recurso ao já robusto programa [Hillier, 2012]. Diversas linguagens populares possuem suas bibliotecas de otimização.

Exemplos de linguagens e respectivas bibliotecas:

- Java

- Joptimizer
<http://www.joptimizer.com/linearProgramming.html>
- scpsolver
<http://scpsolver.org/>
- Linguagem C
 - openMVG
https://openmvg.readthedocs.io/en/latest/openMVG/linear_programming/lp/
 - WNLIB
<http://www.willnaylor.com/wnlib.html>
- Python
 - Scipy
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/index.html>
 - PuLP-or
<https://pypi.org/project/PuLP/>

O Problema do Transporte

O Problema do Transporte é um dos problemas clássicos encontrados na literatura de Programação Linear. De maneira geral o problema consiste em realizar a distribuição de itens de múltiplas origens para múltiplos destinos considerando custos específicos para cada par origem-destino. Cada origem pode ter um número determinado de itens disponíveis para sua distribuição e cada destino e sua respectiva demanda, que pode ser um número fixo, mínimo ou máximo. Por último, são dadas as rotas possíveis entre as origens e destinos e seus respectivos custos [Hillier, 2012].

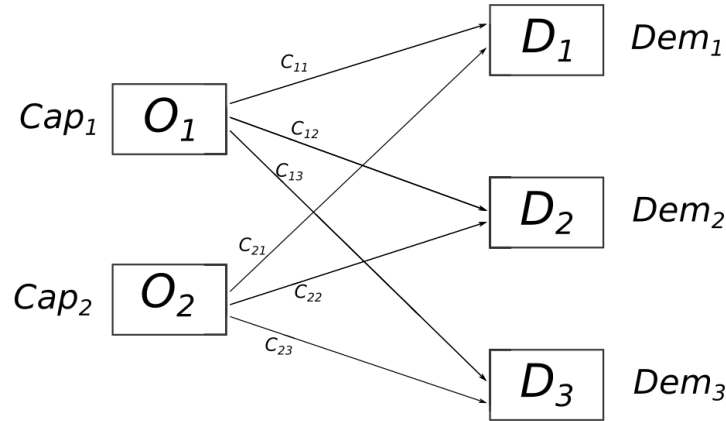


Figura 2.8: Representação gráfica das variáveis do Problema do Transporte. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Este tipo de problema pode ser modelado no formato de Programação Linear e resolvido com os métodos de otimização.

Variações do Problema do Transporte, podem ocorrer em distintos cenários. Nos casos em que a demanda é igual a oferta temos um problema balanceado; quando são valores distintos, diz-se que é um problema desbalanceado. Uma forma de contornar esse problema é incluindo na oferta ou na demanda uma quantidade fictícia ou "fantasma" que possibilita a realização da conta matemática. A solução final do problema evidencia quais serão os locais que na realidade não serão atendidos por receberem uma oferta fictícia.

Em outros casos é necessário comparar variáveis mutualmente excludentes, isto é, a escolha de uma variável necessariamente exclui a possibilidade de uso de uma outra. Para casos como este, podem ser inseridas restrições às variáveis para que sejam inteiras e assumam valores entre 0 e 1 [WINSTON, 2004].

2.6 Python e PuLP

Python

A linguagem de programação Python foi criada no início dos anos de 1990 por Guido van Rossum nos Países Baixos e desde a sua primeira versão a linguagem tem código

aberto. Atualmente, a linguagem é desenvolvida com a contribuição de várias pessoas e é mantida pela Python Software Foundation [PFS, 2010].

A origem do nome é uma referência ao grupo britânico Monty Python, criadores da série Monty Python's Flying Circus. A linguagem é interpretada, ou seja, primeiro é executada em um interpretador e posteriormente executada pelo sistema operacional do usuário. Ela foi concebida com alto nível de abstração, o que a torna de fácil entendimento em relação a outras linguagens de baixo nível de abstração. Além disso, é orientada a objetos e, apesar do sucesso, não traz recursos que já não estivessem disponíveis em outras linguagens, sendo sua grande vantagem a facilidade de sua sintaxe, prática e amigável. Hoje é utilizada em diversas aplicações distintas, conta com ampla oferta de bibliotecas e se destaca frente a outras linguagens em fóruns especializados [KAY, 2010].

PulP

PulP-or, ou simplesmente PulP, é uma biblioteca para solução de problemas de Programação Linear (PL) e Programação Inteira (PI) para linguagem Python criada por Stuart Mitchell. A biblioteca foi desenvolvida de modo a deixar que sua notação se aproxime da notação matemática convencional de Programação Linear, coerente com a filosofia de sintaxe amigável da linguagem Python [MITCHELL, 2009].

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Classificação da Pesquisa

Ao longo do desenvolvimento da ciência acadêmica, os procedimentos de realização de pesquisa passaram por processos de especialização. Ao longo do tempo, foram definidas categorias de forma a organizar o conhecimento gerado. Pesquisas acadêmicas são realizadas utilizando procedimentos racionais e sistemáticos e têm como objetivo trazer respostas para problemas propostos. Para isso utilizam-se conhecimentos disponíveis e métodos, técnicas e outros procedimentos [Gil, 2002]. Na literatura, sobre o assunto, existem diferentes formas de categorização. A presente pesquisa será delimitada tomando por base a natureza da pesquisa, o problema e os objetivos. Neste capítulo será abordado ainda o Problema Formulado.

3.1.1 Natureza da Pesquisa

Em relação à natureza este trabalho, ele trata de Pesquisa Aplicada. Esse tipo de pesquisa visa obter conhecimentos de aplicações reais de um determinado objeto de estudo [SILVA, 2005].

3.2 Procedimentos Técnicos

3.2.1 Definição do Problema

Para o presente trabalho foi fornecido um conjunto de dados da Operação Carro-Pipa referentes ao estado do Ceará. Os dados foram disponibilizados em arquivos de texto e continham as capacidades de fornecimento de água potável de cada ponto de captação, as demandas de cada ponto de entrega de água e a matriz de distâncias entre todos os pontos de captação e entrega de água. Também foi fornecido o valor do Montante (cálculo que o Exército realiza para pagamento) para os dados fornecidos. Descrição das informações fornecidas:

- A *demanda* de volume de água em m^3 de 4.599 pontos;
- A *capacidade de fornecimento (oferta)* de água em m^3 de 36 pontos;
- A matriz de distâncias entre todos os pontos de *demanda* e *oferta* em metros;
- O montante Atual - 1.085.601.588.

Além destas foram dadas informações adicionais que devem ser consideradas no modelo, conforme disposto na lista a seguir:

1. A qualidade de água varia conforme a fonte. Sendo assim, é preferível que haja priorização de acordo com a qualidade da água da origem.
2. Um destino deve receber água de uma *única* origem;
3. O cálculo do fornecimento deve ser em números inteiros;
4. Uma origem pode fornecer água para múltiplos destinos, limitada apenas pela sua capacidade de fornecimento;
5. Não há limitação de rota entre as origens e destinos, isto é, qualquer origem, em tese, pode entregar em qualquer destino;

6. Os dados são dinâmicos. Novas origens e destinos podem ser incluídos ou excluídos a cada mês;
7. O custo varia linearmente conforme a distância, dado o cálculo do Momento de Transporte.

A qualidade da água varia de um manancial para outro. Em termos de saúde é interessante utilizar prioritariamente a água de melhor qualidade e, posteriormente a água dos reservatórios de qualidade inferior. Essa priorização aumenta o custo em relação ao transporte porém aumenta o ganho no quesito saúde.

3.3 Modelo de Otimização das Rotas

3.3.1 Modelo Matemático

O passo seguinte após a coleta de dados foi a elaboração de um modelo matemático de programação linear que atendesse as necessidades do problema.

A Tabela 3.1 representa as variáveis envolvidas no problema:

Demanda		Oferta				
		Of_1	Of_2	Of_3	...	Of_n
D_1		$Dist_{11}$	$Dist_{12}$	$Dist_{13}$...	$Dist_{1n}$
D_2		$Dist_{21}$	$Dist_{22}$	$Dist_{23}$...	$Dist_{2n}$
D_3		$Dist_{31}$	$Dist_{32}$	$Dist_{33}$...	$Dist_{3n}$
...	
D_m		$Dist_{m1}$	$Dist_{m2}$	$Dist_{m3}$...	$Dist_{mn}$

Tabela 3.1: Matriz de Distâncias.

Onde:

- D_m é o volume de água demandado pelo ponto m ;
- O_n é a capacidade de fornecimento do ponto n ;
- $Dist_{mn}$ é a distância entre os pontos m e n .

Tomando como base os exemplos, foram formuladas as seguintes funções:

Função Objetivo

$$Min \ Fobj = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} dist_{ij} \quad (3.1)$$

Onde:

- x_{ij} é o volume de água que o destino i recebe da origem j ;
- $Dist_{ij}$ é a distância entre os pontos i e j .

Restrições Básicas

O problema apresenta duas restrições básicas, a primeira no lado da demanda, a somatória da entrega para cada destino tem que ser igual a demanda.

Restrição da Demanda

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = dem_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

Onde:

- x_{ij} é o volume de água que o destino i recebe da origem j ;
- dem_i é a demanda do destino i .

A segunda restrição básica acontece no lado da oferta o somatório do volume de água despendido por um manancial tem que ser menor ou igual a sua capacidade máxima.

Restrição da Oferta

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq of_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Onde:

- x_{ij} é o volume de água que o destino i recebe da origem j ;
- of_j é o volume fornecido pela origem j .

A fim de atingir o efeito desejado do item 2 “Um destino deve receber água de uma única origem”. Na modelagem o problema foi resolvido em três etapas:

1. Variáveis binárias Y_{ij} foram criadas na mesma quantidade de variáveis X_{ij} do problema.
2. Cada variável X_{ij} deve ser menor ou igual a sua respectiva variável Y_{ij} multiplicada pela Demanda da linha j
3. O somatório das variáveis Y_{ij} de uma mesma linha j devem resultar em 1, obrigando que apenas uma das variáveis Y_{ij} desta linha prevaleça, conseqüentemente, apenas sua respectiva variável X_{ij} também prevalece.

Restrições Binárias

$$x_{ij} \leq y_{ij}dem_i, \quad \forall i \in \{1, m\}, j \in \{1, n\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.5)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, m\}, j \in \{1, n\} \quad (3.6)$$

Modelo Matemático Final

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \text{dist}_{ij} \\ \text{Sujeito a: } &\sum_{j=1}^n x_{ij} = \text{dem}_i, \quad i = 1, \dots, m \\ &\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \text{of}_j, \quad j = 1, \dots, n \\ &x_{ij} \leq y_{ij} \text{dem}_i, \quad \forall i \in \{1, m\}, \quad j \in \{1, n\} \\ &\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m \\ &y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, m\}, \quad j \in \{1, n\} \end{aligned}$$

3.3.2 Programação Computacional do Modelo

Neste passo, o modelo matemático desenvolvido foi transformado em código. Este passo foi executado em duas etapas. A primeira foi o desenvolvimento de um código para um exemplo trivial com poucas variáveis e de resposta óbvia, afim de evidenciar a ocorrência de erros. O intuito também foi validar a Biblioteca PuLP na solução de problemas. Após o desenvolvimento com sucesso do script que dava solução para o problema trivial, partiu-se para a programação de um novo código capaz de resolver problemas cujas entradas não fossem determinadas a priori, atendendo assim o item 6 da lista. Desenvolvido o código, foi testado com outro conjunto de dados reduzidos e verificação de possíveis falhas.

A linguagem Python foi escolhida considerando a robustez da linguagem e o fato de ser de código aberto. A biblioteca PuLP foi escolhida por apresentar mais recursos nativos que sua opção alternativa, a biblioteca SciPy.

3.3.3 Otimização dos Dados Cedidos

Após validação do código foi realizada a busca da solução com o conjunto de dados cedidos. Dado o número de variáveis e restrições o esforço computacional na solução do modelo é razoável. O programa foi bem-sucedido; no entanto o tempo de execução é

considerável. O código foi processado em um notebook com processador Core i7 e 8Gb de memória RAM. Após processamento, foi realizada verificação se todas as rotas necessárias foram designadas e anotado o respectivo resultado, este foi identificado como Programa 1. O código está descrito no Anexo I e os resultados apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

3.3.4 Refinamento do Código

Para atender ao requisito do item 1 da lista, priorização distinta entre os pontos de captação, a proposta consistiu em aumentar de maneira fictícia a distância dos pontos aos mananciais com qualidade de água inferior. Desta forma o custo de abastecimento destes pontos aumenta e o modelo prioriza os mananciais de melhor qualidade. A alteração no código foi inclusão de um vetor "qualiAgua", com os valores a serem multiplicados pela distância de cada manancial. O código desta etapa está apresentado no Anexo II. Para efeito de teste foram utilizados três tipos de qualidade de água. Os mananciais foram divididos nos seguintes grupos:

- A – de 1 a 600m de água, 25 pontos de captação;
- B – de 601 até 100.000m de água, 6 pontos de captação;
- C – mais de 100.000m de água, 5 pontos de captação.

O grupo A foi considerado de melhor qualidade não ocorrendo aumento fictício da distância. Os grupos B e C tiveram testes realizados com os seguintes valores de aumento conforme Tabela3.2:

Tipo de Reservatório	Teste 1	Teste 2	Teste 3
A	0%	0%	0%
B	0%	10%	20%
C	0%	20%	40%

Tabela 3.2: Aumento Relativo nas Distâncias - Elaborado pelo Autor

3.3.5 Limitações do Modelo

O modelo proposto e sua respectiva implementação em programa de computador apresentam limitações técnicas quanto aos dados de entrada. Existem situações em que os casos reais podem extrapolar a capacidade do modelo proposto.

Limitações:

- A oferta total de água deve ser maior ou igual a demanda total;
- É necessária a indicação de todas as distâncias entre todos os pares de origem-destino;
- Os dados de volume de água e distância devem ser números inteiros;
- Os valores de multiplicação para aumento fictício da distância devem ser números inteiros.

Na ocorrência de uma ou mais dessas limitações, adaptações podem ser feitas afim de ter a melhor solução possível.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da metodologia empregada e os resultados das soluções para o problema.

4.1 Análise da Metodologia

Os procedimentos utilizados no desenvolvimento do modelo foram adaptados a partir do modelo de referência, limitado pelo escopo de aplicar o modelo apenas a um conjunto de dados fornecidos. Entretanto, o volume de dados fornecido é bem representativo. Os passos seguidos apresentaram eficácia na obtenção do resultado técnico esperado. O modelo foi capaz de retornar rotas otimizadas para o processo e conseguiu proporcionar a prioridade desejada entre os pontos de captação de água.

4.2 Resultados do Modelo

4.2.1 Otimização das Rotas

O modelo testado tinha como primeiro objetivo a indicação dos pares origem-destino que desse a rota otimizada para reduzir o trajeto dos carros-pipa. Em comparação com a situação real encontrada nas rotas da OCP (1.085.601.588), a Função Objetivo do Pro-

Programa / Teste	Val. Fobj	Tempo de Processamento	% Otimizada
Programa 1	1.018.328.511	2 horas e 48 minutos	6,20
Programa 2 Teste 1	1.018.328.511	2 horas e 57 minutos	6,20
Programa 2 Teste 2	1.023.398.679	4 horas e 31 minutos	5,73
Programa 2 Teste 3	1.027.271.731	3 horas e 41 minutos	5,37

Tabela 4.1: Resultados dos Programas e Testes - Fonte: Elaborado pelo autor.

grama 1 com as rotas otimizadas obteve ganho de 6,20% na otimização das rotas conforme a tabela 4.1. Os testes do Programa 2 também apresentaram ganhos expressivos, ainda que com rotas subótimas.

Extrapolando os valores para as estimativas atuais do programa, cerca de R\$1 bilhão, o valor de 6,20% representa uma possível economia da ordem de R\$61,9.

O valor da Função Objetivo no Teste 1 do Programa 2, conforme o esperado, obteve o mesmo resultado do Programa 1. Neste não foi incluída priorização. Observa-se como diferença o tempo superior de execução.

Os Testes 2 e 3 tiveram suas respectivas funções objetivas maiores, resultado devido ao fato de que as soluções do ponto de vista das rotas são inferiores à otimizada. Os tempos de execução tiveram seus valores aumentados significativamente, resultado esperado dado o aumento fictício das distâncias e o aumento do número de cálculos.

O fato do valor de o Teste 3 ser inferior ao do Teste 2 também corrobora que o aumento da distância no cálculo aumenta o tempo de processamento. Os valores utilizados nos Testes 3 foram numericamente inferiores aos do Teste 2, mantendo-se somente a porcentagem relativa entre os valores.

4.2.2 Priorização dos Mananciais com Melhor Qualidade de Água

O segundo objetivo específico do modelo seria possibilitar a priorização entre mananciais, considerando a qualidade de água. A figura 4.1 apresenta os dados do volume total de água fornecido por cada manancial em cada um dos três testes.

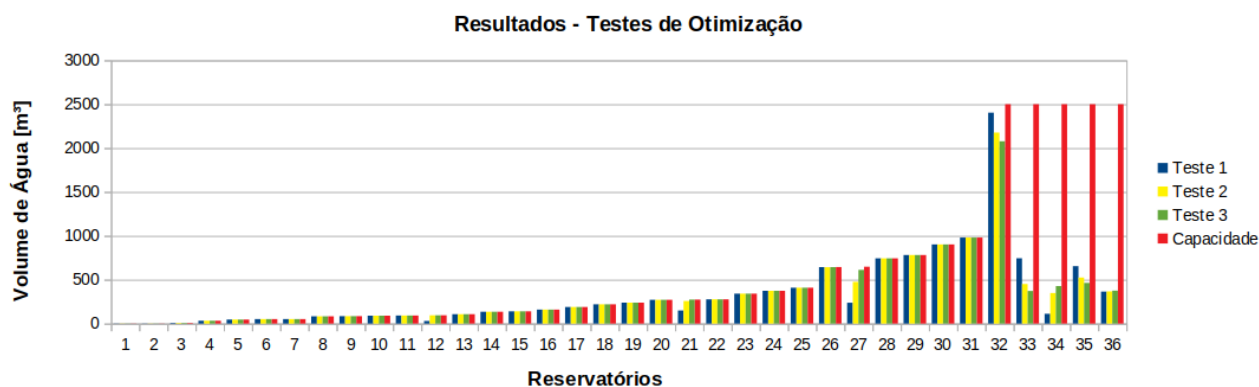


Figura 4.1: Volume de água fornecido por cada reservatório - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam o mesmo resultado da figura 4.1, porém com recortes distintos, o primeiro em relação aos mananciais do Tipo A e o segundo com os mananciais dos Tipos B e C.

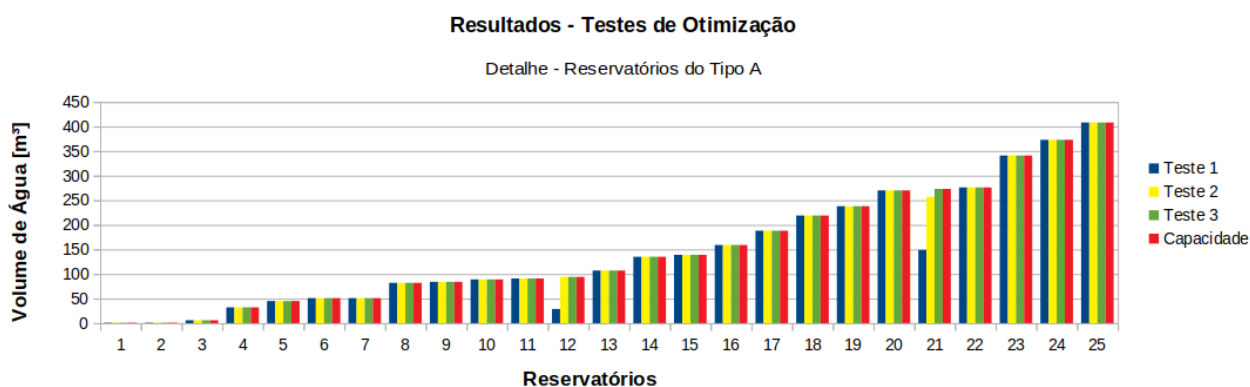


Figura 4.2: Volume de água fornecido - Reservatórios Tipo A - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor

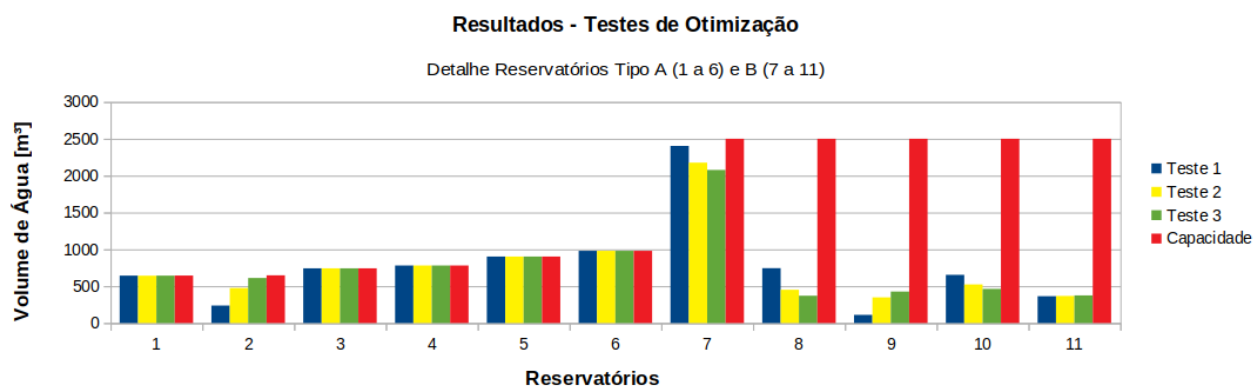


Figura 4.3: Volume de água fornecido - Reservatórios Tipo B e C - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor

Por último foi feito um gráfico com o percentual de utilização dos pontos de captação de cada tipo apresentado na figura 4.4.

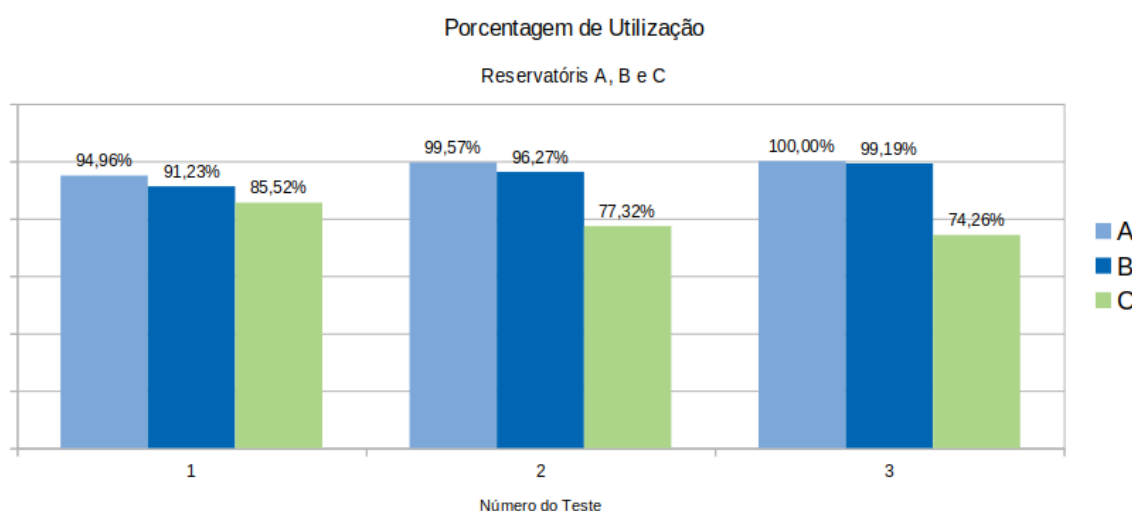


Figura 4.4: Percentual de utilização dos reservatórios - Testes 1, 2 e 3 - Produzido pelo autor

Observando o gráfico 4.4 percebe-se que os reservatórios do Tipo A, no Teste 1 estão próximos a sua capacidade máxima. Os reservatórios do Tipo B, no Teste 1, estavam em 91,23% de utilização e no Teste 2, ultrapassaram os 96% e os reservatórios do Tipo C tiveram queda na sua utilização. Os dados utilizados para comparação das origens do Tipo C foram menores que suas capacidades reais, somente para título de comparação.

Trata-se de rios de grande volume e apresentar os dados conforme fornecidos dificultaria a visualização.

No entanto, pode-se apontar que houve significativa troca da origem da água, reduzindo o uso dos reservatórios apontados como de qualidade inferior neste caso em particular, sendo que os reservatórios do grupo A estavam próximos a sua capacidade máxima já no Teste 1, o que limitou efeito da priorização.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusão

Os possíveis benefícios econômicos identificados, ultrapassaram R\$60 milhões, valor significativo para o contexto brasileiro. Além de benefícios financeiros, os resultados podem gerar mais benefício social para as pessoas que hoje são atendidas por essa política pública. Por fim, as informações coletadas se acrescentam a outros trabalhos e publicações que tratam da importância da Operação Carro-Pipa.

No que tange ao ponto de vista teórico, o modelo proposto é capaz de atender a demanda da Operação Carro-Pipa. Pela dinâmica do programa, de constante atualização das informações, percebe-se que do ponto de vista prático é necessário o desenvolvimento ou aquisição de software com interface para o usuário da solução final ou ainda contratação de serviços de especialistas. A presente pesquisa fornece subsídios para tal propósito.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em relação ao refinamento do modelo sugere-se a inclusão de variáveis adicionais como a qualidade das estradas entre os pontos de captação e entrega, que pode ser uma oportunidade de melhoria do modelo.

Outra oportunidade de pesquisa é a comparação de métodos e algoritmos de otimização, tanto em relação aos ganhos de otimização das rotas quanto em relação ao tempo computacional demandado.

Para trabalhos em outras áreas do conhecimento, sugere-se a análise do custo benefício de priorização das rotas com os ganhos em saúde. O requisito da priorização de mananciais se deve ao fato de buscar utilizar melhor qualidade de água, pensando em resultados na saúde. Trabalhos que indiquem estes ganhos corroboram ou não a necessidade de priorização.

Referências

- [ABREPO, 2009] ABREPO, P. (2009). Um panorama da engenharia de produção. <http://www.abepro.org.br/interna.asp?ss=1c=924>. 4
- [Agência Nacional de Águas, 2017] Agência Nacional de Águas, B. (2017). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017 : relatório pleno / agência nacional de Águas. <http://conjuntura.ana.gov.br/>. ix, 9, 10, 11, 14, 15
- [ANA, 2012] ANA, A. (2012). A questão da Água no nordeste / centro de gestão e estudos estratégicos, agência nacional de Águas. – Brasília, df. x, 16
- [Campos, 2014] Campos, J. N. B. (2014). Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. estudos avançados. 6
- [CHIAVENATO, 2003] CHIAVENATO, I. C. (2003). *Introdução à Teoria Geral da Administração: uma visão abrangente da moderna administração das organizações - 7ª ed. rev. e atual - Rio de Janeiro*. ELSEVIER. 22
- [DNOCS, 2013] DNOCS (2013). História dnocs. disponível em: <https://www2.dnocs.gov.br/historia>. pesquisado em: 17-11-2018. 3
- [Gil, 2002] Gil, A. C. (2002). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa - 4.ed - São Paulo*. Atlas. 30
- [Hillier, 2012] Hillier, F. S. (2012). *Introdução à Pesquisa Operacional (Em Português do Brasil)*. AMGH. 22, 23, 26, 27
- [KAY, 2010] KAY, R. K. (2010). How-to python - computerworld. <https://www.computerworld.com/article/2556925/app-development/python.html>. 29
- [Ministério da Defesa, 2009] Ministério da Defesa, N. (2009). Cartilha da operação carro-pipa - anexo c. <https://contas.tcu.gov.br/etcu/ObterDocumentoSisdoc?seAbrirDocNoBrowser=true&codigo=6027032>. 21
- [Ministério da Integração, 2005] Ministério da Integração, N. (2005). Portaria interministerial nº 7 de 10 de agosto de 2005. http://www.lex.com.br/doc411892_portaria_interministerial_n7D_E10D_Eagosto_de_2005.aspx. 17
- [Ministério da Integração, 2011] Ministério da Integração, N. (2011). Regimento interno do ministério da integração nacional. <http://www.integracao.gov.br/regimento-interno>. 18

- [Ministério da Integração, 2012] Ministério da Integração, N. (2012). Portaria interministerial nº 1/mi/md, de 25 de julho de 2012. <http://www.mi.gov.br/documents/10157/3776390/InstruNormativa01+enfrentamento+da+seca.pdf/9435b63f-f14c-4844-96d8-45cebefccaf5>. 15, 17, 18
- [Ministério da Integração, 2015] Ministério da Integração, N. (2015). Portaria interministerial nº 2/mi/md, de 27 de março de 2015. <http://www.mi.gov.br/documents/301094/3902588/Portaria+Interministerial+MI-MD+n%C2%BA+2+de+2015.pdf/08aae64f-c29f-420a-bc5d-6ca376c0b267>. 17
- [Ministério da Integração, 2018] Ministério da Integração, N. d. B. (2018). Termo de execução descentralizada n 3 de 2018 - sedec. http://www.integracao.gov.br/documents/10157/4295243/TED+03_2018+-+SedecFubUnb.pdf/1f286962-957f-4fcd-ab86-763345efc008. 4
- [MITCHELL, 2009] MITCHELL, S. M. (2009). An introduction to pulp for python programmers. *The Python Papers Monograph*, (1). 29
- [MORTENSON, 2015] MORTENSON, Michael J. Mortenson, N. F. D. S. R. (2015). Operational research from taylorism to terabytes: A research agenda for the analytics age. *European Journal of Operational Research*, (241):583–595. 23
- [PFS, 2010] PFS, P. S. F. (2010). <https://www.python.org/psf/>. 29
- [PNQA, 1975] PNQA, P. (1975). Portal da qualidade das Águas - indicadores de qualidade das Águas (iqa). <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. x, 12, 13
- [SILVA, 2005] SILVA, E. L. d. S. E. M. M. (2005). Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação - florianópolis. 30
- [Tribunal de Contas da União, 2013] Tribunal de Contas da União, T. (2013). Relatório de auditoria – grupo i – classe v – plenário . tc 043.346/2012-0. <https://contas.tcu.gov.br/etcu/ObterDocumentoSisdoc?seAbrirDocNoBrowser=true+codArqCatalogado=6209127>. 4, 20, 22
- [WINSTON, 2004] WINSTON, Winston L. Weyne, J. B. G. (2004). *Operations Research Applications and Algorithms 4th Edition - Indiana University*. THOMSON. 28

Anexo I

Programa 1

Linguagem Python 3.6

```
from pulp import *
import time

start = time.time()

#arquivos com os dados
oferta      = open('oferta.txt', 'r')
demanda     = open('demanda.txt', 'r')
distancias  = open('dist2.txt', 'r')
result      = open('resultado.txt', 'w')

#leitura dos arquivos
cOferta      = list(map(int, oferta.read().split()))
cDemanda     = list(map(int, demanda.read().split()))
cDistancias  = list(map(int, distancias.read().split()))

#fechamento dos arquivos de leitura
oferta.close()
distancias.close()
demanda.close()

#vetores de demanda e oferta
vDemanda     = [] # de 1 a numero total de pontos de demanda
vOferta      = [] # de 1 a numero total de pontos oferta
vDistancia   = []
```

```

#Preenchendo vetores
for i,x in enumerate(cDemanda):
    vDemanda.append(i+1)

for i,x in enumerate(cOferta):
    vOferta.append(i+1)

#Criacao do problema
prob = LpProblem("mainPulp",LpMinimize)

cont          = 0
ldemanda      = []
mDistancias   = []

for i in cDemanda:
    for j in cOferta:
        ldemanda.append(cDistancias[cont])
        cont += 1
    mDistancias.append(ldemanda)
    ldemanda = []

#matriz Oferta x Demanda formato [Demanda, Oferta] [Linha, Coluna]
#Tecnica de list comprehension
matrizDO = LpVariable.dicts("matrizDO",[(i,j)
    for i in vDemanda for j in vOferta], 0,None,LpInteger)

#Vetor que modifica a % relativa entre os reservatorios
qualiAgua = [5,5,5,5,7,5,6,5,5,5,5,6,5,5,5,6,5,5,6,6,6,5,5,5,5,
    5,5,5,5,7,5,5,7,5,7,7]

#Funcao Objetivo
prob += lpSum(mDistancias[i-1][j-1] * matrizDO[(i,j)] * qualiAgua[j-1]
    for i in vDemanda for j in vOferta)

```

```

#Restricao de demanda – linhas
for i in vDemanda:
    prob += lpSum(matrizDO[(i,j)] for j in vOferta) == cDemanda[i-1]

#Restricao de oferta – colunas
for i in vOferta:
    prob += lpSum(matrizDO[(j,i)] for j in vDemanda) <= cOferta[i-1]

#Variaveis binarias = numero de Municipios ou demanda

#Cria o variaveis binarias
rBin = LpVariable.dicts("rBin",matrizDO,0,1,LpBinary)

#Restricoes binarias – cada coluna item das colunas <= rBin respectivo
for i in vDemanda:
    for j in vOferta:
        prob += matrizDO[(i,j)] <= rBin[(i,j)] * cOferta[j-1]

for i in vDemanda:
    prob += lpSum(rBin[(i,j)] for j in vOferta) == 1

# Chamada da Funcao Resolucao da Funcao Objetivo
prob.solve()

#Impressao de valores e registro em arquivo
for v in prob.variables():
    if v.varValue > 0:
        print(v.name, "□=□", v.varValue)

        result.write(v.name)
        result.write("□=□")
        result.write(str(v.varValue))
        result.write('\n')

print("Total□Profit:□", value(prob.objective))
result.write("Total□Profit:□")

```

```
result.write(str(value(prob.objective)))  
result.write('\n')
```

```
#contagem do tempo de processamento
```

```
tempo = time.time() - start
```

```
result.write("Tempo de processamento ")
```

```
result.write(str(tempo))
```

```
result.close()
```

Anexo II

Programa 2

Linguagem Python 3.6

```
from pulp import *
import time

start = time.time()

oferta      = open('oferta.txt', 'r')
demanda     = open('demanda.txt', 'r')
distancias  = open('dist2.txt', 'r')
result      = open('resultado3.txt', 'w')

# oferta      = open('ofertateste', 'r')
# demanda     = open('demteste', 'r')
# distancias  = open('distanciateste', 'r')
# result      = open('resultadoteste.txt', 'w')

cOferta      = list(map(int, oferta.read().split()))
cDemanda     = list(map(int, demanda.read().split()))
cDistancias  = list(map(int, distancias.read().split()))

oferta.close()
distancias.close()
demanda.close()
```

```

#vetores de demanda e oferta
vDemanda    = [] #[1 a n de demanda]
vOferta      = [] #[1 a n oferta]
vDistancia  = []

for i,x in enumerate(cDemanda):
    vDemanda.append(i+1)

for i,x in enumerate(cOferta):
    vOferta.append(i+1)

#Criacao do problema
prob = LpProblem("mainPulp",LpMinimize)

cont        = 0
ldemanda    = []
mDistancias = []

for i in cDemanda:
    for j in cOferta:
        ldemanda.append(cDistancias[cont])
        cont += 1
    mDistancias.append(ldemanda)
    ldemanda = []

#matriz Oferta x Demanda formato [Demanda, Oferta] [Linha, Coluna]
matrizDO = LpVariable.dicts("matrizDO",[(i,j) for i in vDemanda
for j in vOferta], 0,None,LpInteger)

qualiAgua = [5,5,5,5,7,5,6,5,5,5,5,6,5,5,5,6,5,5,6,6,6,5,5,5,5,5,5,
5,5,7,5,5,7,5,7,7]

#Funcao Objetivo
prob += lpSum(mDistancias[i-1][j-1] * matrizDO[(i,j)] * qualiAgua[j-1])

```

```

for i in vDemanda for j in vOferta)

#Restrição de demanda – linhas
for i in vDemanda:
    prob += lpSum(matrizDO[(i,j)] for j in vOferta) == cDemanda[i-1]

#Restrição de oferta – colunas
for i in vOferta:
    prob += lpSum(matrizDO[(j,i)] for j in vDemanda) <= cOferta[i-1]

#Variáveis binárias = número de Municípios ou demanda

#Criação de variáveis binárias
rBin = LpVariable.dicts("rBin",matrizDO,0,1,LpBinary)

#Restrições binárias – cada coluna item das colunas <= rBin respectivo
for i in vDemanda:
    for j in vOferta:
        prob += matrizDO[(i,j)] <= rBin[(i,j)] * cOferta[j-1]

for i in vDemanda:
    prob += lpSum(rBin[(i,j)] for j in vOferta) == 1

#
prob.solve()

for v in prob.variables():
    if v.varValue > 0:
        print(v.name, "□=□", v.varValue)

        result.write(v.name)
        result.write("□=□")
        result.write(str(v.varValue))
        result.write('\n')

print("Total□Profit:□",value(prob.objective))

```

```
result.write("Total_Profit:")
result.write(str(value(prob.objective)))
result.write('\n')

end = time.time()

tempo = end - start

result.write("Tempo_de_processamento")
result.write(str(tempo))
result.close()
```